



Year: 2015

Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010)

Suarez, Wilson ; Macedo, Nicolás ; Montoya, Nilton ; Arias, Santos ; Schauwecker, Simone ; Huggel, Christian ; Rohrer, Mario ; Condom, Thomas

Abstract: En el Perú se ubican cerca del 71% de los glaciares tropicales del planeta, y los glaciares de la Cordillera Blanca (norte de Lima) son los más estudiados; del resto de los glaciares se tiene un limitado conocimiento basado en la información que proporcionan las imágenes de satélite. Ante esta situación el Proyecto de Adaptación al Retroceso Acelerado de los Glaciares en el año 2010 adquirió dos estaciones meteorológicas para el monitoreo del entorno de los glaciares en el centro y sur del Perú. Por su importancia estratégica en términos de reserva de agua, en base a su tamaño y forma en el glaciar Quisoquipina se instaló una estación climatológica. Actualmente, está siendo monitoreado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, la Universidad San Antonio Abad de Cusco y la Autoridad Nacional del Agua. El glaciar Quisoquipina se encuentra dentro de la Cordillera Vilcanota (sur del Perú), y esta Cordillera es la segunda cadena de glaciares más importante, con aproximadamente 279 km² (2009). El agua producto de su fusión es utilizado para la regulación de generación de energía eléctrica en los meses de estiaje y durante todo el año en la producción de auquénidos. El presente artículo muestra los primeros resultados del análisis climático de los datos registrados en la estación climática Quisoquipina, con un enfoque sobre la temperatura del aire y el balance de radiación neta, además los resultados de la comparación del balance de radiación neta con los resultados obtenidos en los glaciares Zongo (Bolivia) y Antizana (Ecuador). Se presenta también la evolución temporal de su cobertura glaciar desde el año 1990 hasta la actualidad mediante el uso de imágenes LANDSAT 5. El derretimiento glaciar es de 11% entre 1990 y 2010 con áreas respectivamente de 3.66 y 3.26 km², esta tasa es comparable al derretimiento observado en otros glaciares de los Andes tropicales. In Peru, there are located about 71% of tropical glaciers, and the glaciers of the Cordillera Blanca (north of Lima) are the most studied; about the rest of the glaciers, there is a limited knowledge based on the information provided by satellite imagery. In response, the Adaptation to Accelerated Glacial Retreat Project in 2010 bought two weather stations for monitoring the glaciers environment in the central and southern Peru. Because of its strategic importance in terms of water conservation, based on its size and shape in the Quisoquipina glacier a weather station was installed. It is currently being monitored by the National Meteorology and Hydrology Service of Peru, the University San Antonio Abad of Cusco and the National Water Authority. The Quisoquipina glacier lies within the Vilcanota Cordillera (southern Peru), and it is the second largest chain of glaciers, with about 279 km² (2009). Meltwater originated from it is used for electricity generation in the months of dry season and throughout the year in the production of camelids. This article presents the

Other titles: Net energy balance (2012-2014) and temporal evolution of the Quisoquipina snow peak in Cusco Region (1990-2010)

Originally published at:

Suarez, Wilson; Macedo, Nicolás; Montoya, Nilton; Arias, Santos; Schauwecker, Simone; Huggel, Christian; Rohrer, Mario; Condom, Thomas (2015). Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010). *Revista Peruana Geo-Atmosferica (RPGA)*, 4:80-92.



Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010)

Net energy balance (2012-2014) and temporal evolution of the Quisoquipina snow peak in Cusco Region (1990-2010)

WILSON SUAREZ ^{*1,2,3}, NICOLÁS MACEDO³, NILTON MONTOYA³, SANTO ARIAS¹, SIMONE SCHAUWECKER^{4,5}, CHRISTIAN HUGGEL⁴, MARIO ROHRER⁵ & THOMAS CONDOM⁶

¹Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Casilla 11 1308, Lima 11, Peru

²Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM)

³Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)

⁴Universidad de Zurich (UZH)

⁵Meteodat GmbH

⁶IRD, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, G-INP, LTRE (UMR 5564), F-38000 Grenoble, France

RESUMEN

En el Perú se ubican cerca del 71% de los glaciares tropicales del planeta, y los glaciares de la Cordillera Blanca (norte de Lima) son los más estudiados; del resto de los glaciares se tiene un limitado conocimiento basado en la información que proporcionan las imágenes de satélite. Ante esta situación el Proyecto de Adaptación al Retroceso Acelerado de los Glaciares en el año 2010 adquirió dos estaciones meteorológicas para el monitoreo del entorno de los glaciares en el centro y sur del Perú. Por su importancia estratégica en términos de reserva de agua, en base a su tamaño y forma en el glaciar Quisoquipina se instaló una estación climatológica. Actualmente, está siendo monitoreado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, la Universidad San Antonio Abad de Cusco y la Autoridad Nacional del Agua. El glaciar Quisoquipina se encuentra dentro de la Cordillera Vilcanota (sur del Perú), y esta Cordillera es la segunda cadena de glaciares más importante, con aproximadamente 279 km² (2009). El agua producto de su fusión es utilizado para la regulación de generación de energía eléctrica en los meses de estiaje y durante todo el año en la producción de auquénidos. El presente artículo muestra los primeros resultados del análisis climático de los datos registrados en la estación climática Quisoquipina, con un enfoque sobre la temperatura del aire y el balance de radiación neta, además los resultados de la comparación del balance de radiación neta con los resultados obtenidos en los glaciares Zongo (Bolivia) y Antizana (Ecuador). Se presenta también la evolución temporal de su cobertura glaciar desde el año 1990 hasta la actualidad mediante el uso de imágenes LANDSAT 5. El derretimiento glaciar es de 11% entre 1990 y 2010 con áreas respectivamente de 3.66 y 3.26 km², esta tasa es comparable al derretimiento observado en otros glaciares de los Andes tropicales.

Palabras claves: Glaciar Quisoquipina, Cordillera Vilcanota, Radiación neta, glaciares tropicales.

ABSTRACT

In Peru, there are located about 71% of tropical glaciers, and the glaciers of the Cordillera Blanca (north of Lima) are the most studied; about the rest of the glaciers, there is a limited knowledge based on the information provided by satellite imagery. In response, the Adaptation to Accelerated Glacial Retreat Project in 2010 bought two weather stations for monitoring the glaciers environment in the central and southern Peru. Because of its strategic importance in terms of water conservation, based on its size and shape in the Quisoquipina glacier a weather station was installed. It is currently being monitored by the National Meteorology and Hydrology Service of Peru, the University San Antonio Abad of Cusco and the National Water Authority. The Quisoquipina glacier lies within the Vilcanota Cordillera (southern Peru), and it is the second largest chain of glaciers, with about 279 km² (2009). Meltwater originated from it is used for electricity generation in the months of dry season and throughout the year in the

*wil_suarez@hotmail.com

production of camelids. This article presents the first results of the climate analysis of the data recorded in the weather station Quisoquipina, with a focus on air temperature and net radiation balance, plus the results of the comparison of the net radiation balance to the results in the Zongo (Bolivia) and Antizana (Ecuador) glaciers. Its glacier cover evolution from 1990 to present is also shown, using LANDSAT 5. The glacier melt was 11% between 1990 and 2010 with areas of 3.66 and 3.26 km², respectively; this rate is comparable to the observed retreat in other glaciers in the tropical Andes.

Keywords: Quisoquipina Glacier, Vilcanota Cordillera, Net Radiation, tropical glaciers.

INTRODUCCIÓN

El Perú debido a su posición geográfica se encuentra íntegramente dentro del cinturón tropical del planeta y es indefectiblemente sensible a las fluctuaciones climáticas que se observan en los últimos años. Vuille et al., (2008) detectaron que la temperatura del aire en los Andes tropicales se ha incrementado con una tasa de 0.1 °C/década desde 1939; Mark & Helmens (2005) indican que en la Cordillera Blanca del Perú la temperatura del aire se incrementó con una tasa de 0.35 a 0.39 °C/década entre 1951 a 1999. Considerando que en la región de los Andes se encuentra cerca del 99% de los glaciares tropicales (Kaser, 1999) de la Tierra, y que estos son muy sensibles a las variaciones climáticas (Kaser y Osmaston, 2002) es necesario su monitoreo constante para comprender su dinámica.

Estudios sobre diferentes glaciares de la región tropical de los Andes de Perú y Ecuador muestran que el factor dominante durante el proceso de fusión es el balance energético (Sicart, 2005 y Juen et al., 2007).

Actualmente, el monitoreo climático y glaciar se encuentra centrado en la Cordillera Blanca. Es la formación glaciar más importante del Perú; cuenta con información climática e hidrológica desde el año 1941 y, también ha sido documentado por diferentes estudios (Kaser et al. 2003; Chevallier et al. 2010; Mark & Helmens 2005; Pouyaud et al. 2005; Juen et al. 2007; Suarez et al. 2008; Vuille et al. 2008). En el sur del Perú los conocimientos sobre los glaciares son más limitados. En la Cordillera Vilcanota, área glaciar más importante de la región sur, estudios recientes han encontrado que en el año 1962 tenía 440 km² (Hidrandina S.A, 1989); en el año 2006, 297 km² (Salzmann et al., 2013); y en el año 2009, 279 km² (Autoridad Nacional del Agua, 2012). Además, la capa de hielo tropical más grande mundo se encuentra en esta Cordillera, y es sitio de una serie de estudios vinculados a la paleoclimatología (Thompson et al., 2006). Considerando que los glaciares son las reservas de agua dulce en la región andina de montaña durante la estación seca (Chevallier et al., 2011) su monitoreo es necesario para comprender la dinámica y el proceso de fusión, sobre todo en una región no muy estudiada.

El presente artículo muestra los primeros resultados de monitoreo climático realizado en un entorno glaciar por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) en la región sur del Perú (Cordillera del Vilcanota). Primero se estudia la evolución de la cobertura espacial del glaciar Quisoquipina mediante imágenes LANDSAT 5. Luego se presenta las primeras características de la temperatura del aire después de dos años de monitoreo (2012–2014), con información proveniente de la estación climática ubicada sobre el glaciar Quisoquipina a 5180 m s.n.m; esta estación climática es la segunda más alta del Perú (la más alta se ubica en el nevado Coropuna a 5800 m s.n.m.) y una de las dos que está ubicada por encima de los 5000 m s.n.m. Finalmente, los resultados permiten comparar y evaluar la radiación neta de los glaciares observados en los Andes de Ecuador y Bolivia con los resultados de la radiación neta encontrados en el glaciar Quisoquipina.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

El glaciar de Quisoquipina se encuentra ubicado en la Cordillera del Vilcanota en el sur del Perú, entre las coordenadas geográficas desde su centro -13.8° de latitud sur y -70.74° de longitud oeste. Tiene una altitud máxima de 5500 m s.n.m. aproximadamente y su frente se ubica a 4950 m s.n.m.

Geográficamente se encuentra a 130 km de la ciudad del Cusco. Desde la ciudad del Cusco hasta la comunidad de Phinaya (comunidad habitada más alta del Perú a 4950 m s.n.m. de altitud) el recorrido es de 6 horas de viaje, las dos primeras horas por una ruta asfaltada y lo último por una ruta sin asfaltar, desde el pueblo de Phinaya el viaje final dura 1 hora por carretera carrozable (trocha).

La Cordillera del Vilcanota, la segunda más extensa del Perú con 279.4 km² (Autoridad Nacional del Agua, 2012), tiene una importancia económica y social en la región del Cusco; almacena el agua proveniente de la fusión glaciaria en la laguna de Sibynacocha que posteriormente es utilizada para regular los caudales de la central hidroeléctrica de Machu Picchu durante los periodos de estiaje, y permite la existencia de pastizales permanentes para la producción de auquénidos (alimenta a más de 15 000 cabezas de alpaca), durante todo el año.

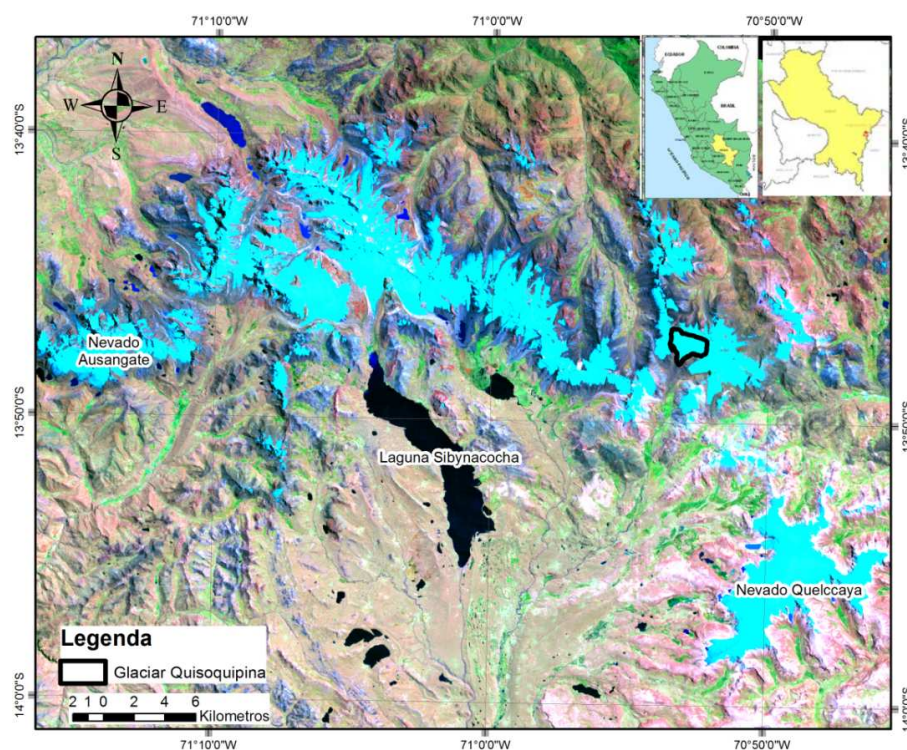


Fig. 1. Posición del glaciar Quisoquipina dentro de la Cordillera del Vilcanota

Contexto del estudio

El SENAMHI orgánicamente se crea el año 1969. Inicialmente contaba con una red nacional de 836 estaciones hidrometeorológicas, de las cuales 756 eran meteorológicas y 80 hidrológicas; esta red ha tenido importantes cambios con el pasar del tiempo, principalmente por razones económicas y sociales (violencia interna de los años 80). En la actualidad, de la red nacional que consta de 670 estaciones convencionales, 137 son hidrológicas, además de 101 estaciones automáticas.

Desde el año 2008 en el marco del Proyecto de Adaptación frente al Retroceso Acelerado de los Glaciares Tropicales (PRAA) el SENAMHI se comprometió a operar dos estaciones climáticas de monitoreo del entorno de los glaciares.

Estas estaciones fueron entregadas en el año 2010. El formato clásico (torre vertical anclada al suelo, donde se colocan los sensores climáticos) representó una limitación, ya que la instalación de la estación asignada para la región sur del Perú debía estar ubicada sobre el glaciar. Esto obligó a

plantear un nuevo tipo de estación (ver datos observados). El desplazamiento constante del glaciar (propio de su dinámica) ocasionaría que la torre se cayera constantemente o no permitiría tener una buena lectura de los sensores de radiación, por lo que se construyó un trípode con un estabilizador giroscópico que permitiera tener los sensores de radiación siempre en posición perpendicular respecto al eje terrestre. Cuando se realizaron las pruebas a la estación, aproximadamente de 10 días, se observó que el estabilizador podía operar correctamente hasta inclinaciones menores de 45° respecto al eje de la Tierra. Este mecanismo permitió de manera paralela limitar las visitas a la estación (3 a 4 veces al año) ya que no existe riesgo de inclinación de los sensores. En la Figura 2 se muestran los resultados de los ensayos realizados de la estación juntamente con los sensores climáticos como también la estación ubicada en su posición final, en el glaciar Quisoquipina.



Fig. 2. De izquierda a derecha. Ensayos de control de inclinación del soporte trípode de la estación climática a ser instalada en el Glaciar Quisoquipina. Estación climática instalada en el glaciar Quisoquipina a 5180 m s.n.m. en la Cordillera del Vilcanota

Evolución de la cobertura y volumen glaciar

El estudio de la cobertura glaciar es la manera más simple de analizar la dinámica de un glaciar, a través de diferentes herramientas disponibles como por ejemplo las fotos aéreas (disponibles desde 1950), levantamientos topográficos e imágenes de satélite (disponible desde mediados de 1970). Los primeros estudios utilizando estas herramientas en la zona de estudio fueron realizados por Brecher H. & Thompson G. (1993), que mediante técnicas de fotogrametría midieron el retiro del glaciar Qori Kalis, el cual pertenece al campo de hielo Quelccaya ubicado 15 km al sur del Quisoquipina. Posteriormente Salzmann et al. (2013) cuantificaron la pérdida de cobertura glaciar de la Cordillera del Vilcanota. El uso de herramientas de percepción remota en los glaciares de la región andina no es nuevo, ya ha sido ampliamente usado en trabajos de cuantificación de pérdida de volumen glaciar, áreas e inventarios, descritos por Rabatel et al. (2013).

Para la separación entre parte glaciar y no glaciar se utilizó el índice Normalized Difference Snow Index (NDSI), ampliamente utilizado en la caracterización de los glaciares en las regiones tropicales (Salzmann et al., 2013; Burns & Nolin, 2014, etc.). Este índice calculado para imágenes LANDSAT 5 presenta la siguiente ecuación:

$$NDSI = \frac{B_2 - B_5}{B_2 + B_5} \quad (1)$$

Donde: B_2 y B_5 son el número de bandas.

El valor del índice oscila entre un margen de -1 a 1. Silverio & Jaquet (2005) determinaron en la Cordillera Blanca que los valores superiores a 0.58 son considerados como glaciares puros. Esta misma

caracterización fue utilizada para el presente estudio. Para el cálculo del volumen se utilizó la ecuación propuesta por Bahr et al., 1997:

$$V = CA^y \quad (2)$$

Donde: V es el volumen glaciar para el tiempo t ; k es una constante teórica de 0.0633 km^{3-2y} ; A es el área glaciar para el tiempo t ; y y es 1.375 (constante calculada por Bahr).

Análisis climático

Temperatura y balance neto energético

La variable temperatura es el principal elemento vinculado al retroceso de los glaciares ya que está relacionado con el incremento de la temperatura global del planeta durante los últimos años (Marzeion et al., 2014)

El balance neto energético sobre el glaciar Quisoquipina es evaluado al ser considerado el motor de los procesos de ablación en la región tropical (Kaser et al., 2004) además se compara nuestros resultados respecto al de otros glaciares tropicales. La ecuación clásica del balance energético ha sido adaptada de Hock (2005)

$$Q_N + Q_H + Q_L + Q_G + Q_R + Q_M = 0 \quad (3)$$

Donde: Q_N es la radiación neta, Q_H flujo de calor sensible, Q_L es flujo de calor latente (Q_H y Q_L son referidos a los flujos de calor turbulentos), Q_G es el flujo de conductividad en la nieve o hielo, Q_R es el flujo de calor sensible aportado por las precipitaciones y Q_M es la energía consumida durante el derretimiento. La tasa de derretimiento (M) es calculado en función a la energía disponible,

$$M = \frac{Q_M}{\rho_W L_f} \quad (4)$$

Donde: ρ_W corresponde a la densidad del agua y L_f es el calor latente de fusión. Cuando Q_M es positivo, el glaciar recibe calor que va a aumentar la temperatura (en caso sea negativo) y luego derretirlo (cuando el punto de deshielo ha sido alcanzado). Considerando que Q_N de la ecuación (3) es:

$$Q_N = S \uparrow + S \downarrow + L \downarrow + L \uparrow \quad (5)$$

Donde: $S \downarrow$ y $S \uparrow$ representan la radiación en onda corta incidente y reflejada, $L \downarrow$ representa la radiación en onda larga proveniente de la atmósfera y $L \uparrow$ la radiación en onda larga emitida por la superficie. Considerando que el albedo es la relación $S \uparrow / S \downarrow$ la ecuación (3) puede simplificarse a:

$$Q_N = S \downarrow (1 - \alpha) + L \downarrow + L \uparrow + Q_H + Q_L + Q_G + Q_R + Q_M = 0 \quad (6)$$

Donde: α representa el albedo.

En la Figura 3 se muestran los procesos de intercambio energético vinculados a un glaciar.

Datos disponibles

Imágenes de satélite

Para el presente estudio se utilizaron imágenes LANDSAT 5 de diferentes años (desde 1990 hasta la actualidad), las cuales tienen una resolución de 30 metros por pixel, y corresponden al periodo seco (abril a setiembre) para evitar errores de confusión con la cobertura nival. Para el proceso de separación, se utilizó el servidor USGS Global Visualization Viewer (GloVis), disponibles de forma gratuita mediante la página web: <http://glovis.usgs.gov>. Las fechas de adquisición de las imágenes son presentadas en la Tabla 1.

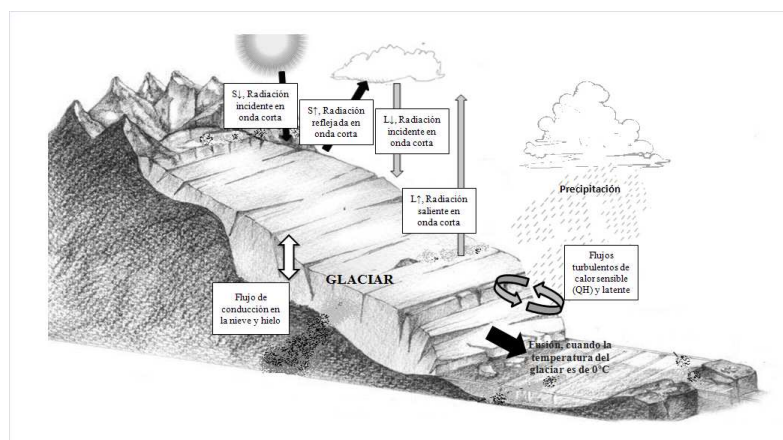


Fig. 3. Balance energético en un glaciar considerando los flujos entrantes y salientes (adaptado de Sastre-Juan Carlos)

Tabla 1. Imágenes de satélite, áreas y volúmenes calculados y caudal equivalente en función del volumen perdido

Satélite	Fecha	Área (km ²)	Pérdida (%)	Volumen (km ³)	Pérdida (%)	Volumen perdido (km ³)	Nº días	Caudal equivalente (l/s)
LANDSAT 5	18-abr-90	3.66	0	0.38	0			
LANDSAT 5	22-ago-95	3.60	1.6	0.37	2.2	0.0085	1952	45 [90-95]
LANDSAT 5	31-may-00	3.46	5.5	0.35	7.4	0.0196	1744	117 [95-00]
LANDSAT 5	29-may-05	3.39	7.4	0.34	10.0	0.0097	1824	55 [00-05]
LANDSAT 5	16-sep-10	3.26	10.9	0.32	14.7	0.0178	1936	95.5 [05-10]

Datos observados

Los datos utilizados corresponden a los recolectados por la estación climática Quisoquipina, con información a paso de tiempo de 30 minutos; la serie utilizada tiene su inicio el 1 de mayo del 2012 hasta el 31 de mayo del 2014. Esta información se encuentra disponible mediante transmisión vía satélite GOES al receptor central que está en el SENAMHI. Las variables registradas por esta estación son temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, altura de nieve, radiación incidente en onda corta y larga, radiación reflejada en onda corta, emitida en onda larga, albedo y presión atmosférica.

Los datos más sensibles de la estación Quisoquipina son los de radiación y temperatura del aire, es decir, los sensores que los miden no son ventilados y las características de su instalación han sido presentadas en las secciones anteriores. En la Tabla 2 se presentan las características técnicas de los sensores adquiridos. La estación fue instalada en el glaciar Quisoquipina a 5180 m s.n.m. en julio del año 2011 pero por problemas eléctricos comenzó a operar desde el 27 de setiembre del mismo año.

Reanálisis 1

El National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) trabajan juntos para la generación de datos retroactivos desde el año 1948. Para alcanzar este objetivo se utiliza una fuente heterogénea de base de datos. En un primer momento se trabajaron para la recuperación de datos en el hemisferio norte y posteriormente en el hemisferio sur. El reanálisis 1 utiliza el modelo operativo global espectral (Gama Media Forecasting, MRF), creado

Tabla 2. Relación de sensores instalados y equipos de la estación climática ubicados en el glaciar Quisoquipina

Item	Sensor	Tipo
1	Datalogger	Cambell CR1000
2	Panel solar	20W
4	Batería	Bateria 20V, 7AH
5	Sensor de temperatura y humedad del aire	Vaisala HMP45C
6	Sensor de velocidad y dirección del viento	Young, Propeller 05103
7	Sensor de presión atmosférica	Vaisala, PTB110
8	Sensor de radiación (piranómetro y pirgeómetro)	Kipp&Zonen, CNR1
9	Sensor de nivel de nieve	Campbell, SR50A
10	Receptor GPS	Garmin 16X-HVS
12	Sistema de transmisión GOES	Cambell, TX320
13	Antena GOES	Campbell, 25316

por el modelo global del NCEP en 1995, y a una resolución de 28 niveles de presión (1.000 hPa a 10 hPa) y 62 cuadrículas de resolución horizontal (192 por 94 longitudes latitudes o malla de $1.9^\circ \times 1.9^\circ$ equivalente a 210 km de resolución). El Análisis del patrón de variación (interpolación) es de 3 dimensiones (3DVAR). Este esquema se llama Spectral interpolación estadística, desarrollado por el NCEP. Los datos de temperatura del aire a 500 hPa están disponibles desde 1948 hasta el presente, y a una resolución de malla de 2.5×2.5 . El modelo del sistema físico se explica mejor por Kalnay et al., 1996.

RESULTADOS

Evolución de la cobertura y volumen glaciar

En la tabla 1 se muestra las áreas de cobertura del glaciar Quisoquipina obtenidos mediante el índice NDSI. El año 1990 la cobertura glaciar del Quisoquipina tenía una extensión de 3.66 km^2 y para el año 2010 se redujo a 3.26 km^2 , lo que representa una pérdida de 0.4 km^2 (10.9%) de cobertura glaciar. El volumen fue determinado en 0.38 km^3 el año 1990 y para el año 2010 se tenía 0.32 km^3 , lo que representa 0.06 km^3 (una disminución de 14.7%). Cabe mencionar que las estimaciones del volumen son aproximadas y normalmente tienen un margen de error de $\pm 30\%$. En particular, los coeficientes en la ecuación de Bahr et al. (1997) deben ser ajustados a las condiciones de la región, además hay que considerar ciertas limitaciones conceptuales en relacionar volumen con área. Frey et al. (2014) cuando comparan diferentes métodos de cálculo de volumen encuentran que la ecuación de Bahr et al. (1997) sobreestima el volumen, comparado con los modelos que están basados en el cálculo del espesor de hielo.

En base a la estimación del volumen se pudo determinar una aproximación del caudal equivalente (multiplicación del volumen por la densidad del agua, 0.9 gr/cm^3) para cada periodo estudiado del que se cuentan los volúmenes. De los caudales equivalentes para el periodo comprendido entre el año 1995 y 2000 se observa un caudal de 117 l/s y para el periodo comprendido entre 2005 y 2010, un caudal de 95.5 l/s. Posiblemente este importante aporte entre 1995 y 2000 esté fuertemente influenciado por el fenómeno El Niño de 1998. Está probado que durante los años Niño, el aumento de las temperaturas en la región acelera la fusión de los glaciares (Francou et al., 2004; Francou et al. 2003; Wagnon et al., 2001). Este cálculo considera el aporte hídrico máximo debido a la pérdida de volumen del glaciar (volumen de derretimiento), pero este volumen de agua líquida no está disponible necesariamente ya que parte de la masa glaciar se pierde por sublimación o infiltración de agua antes que salga del frente glaciar.

BALANCE ENERGÉTICO NETO DEL NEVADO QUISOQUIPINA

Tabla 3. Temperatura promedio del aire mensual, glaciar Quisoquipina

	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	Promedio
	°C												
2012-13	-1.10	-2.40	-2.50	-2.20	-1.60	-0.50	0.70	0.10	0.00	0.40	0.70	-0.10	-0.71
2013-14	-0.70	-2.20	-2.80	-2.00	-1.30	-0.30	0.50	0.20	0.20	0.40	0.30	-0.20	-0.66

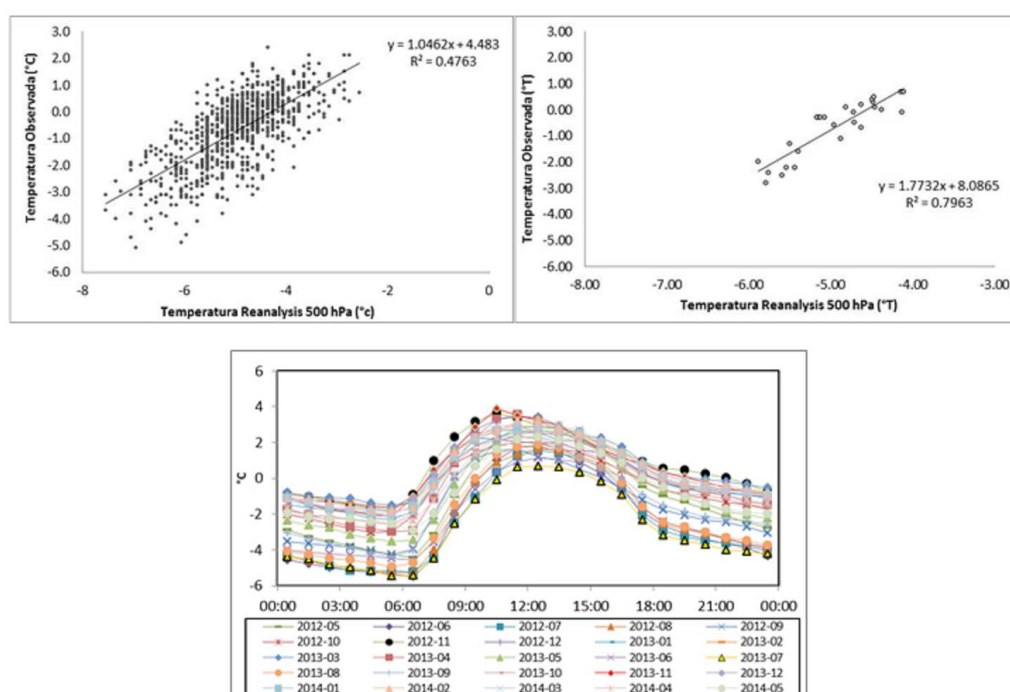


Fig. 4. Temperatura del aire observada sobre el glaciar Quisoquipina versus el Reanalysis 1 (NOAA–NCEP/NCAR 500 hPa) a paso de tiempo diario (superior izquierda), temperatura del aire observada sobre el glaciar Quisoquipina versus el reanálisis a paso de tiempo mensual (superior derecha) y distribución diaria de la temperatura evaluada mes por mes (inferior).

Análisis de variables climáticas

Conocer la variación de las condiciones climáticas en esta región del país (hasta ahora poco estudiada) y sobre todo las condiciones que se registran en sus glaciares, puntualmente en el nevado Quisoquipina, es de suma importancia, considerándose que no existen muchos datos climáticos dentro de la cordillera y algunos pocos existentes se encuentran en el valle del río Urubamba (este río nace en la cordillera del Vilcanota) y sobre el nevado Quelcaya. El análisis corresponde a la información registrada en la estación climática ubicada sobre el nevado Quisoquipina. Respecto a los datos de temperatura del aire se cuenta con información desde setiembre del 2011 hasta la actualidad, pero el análisis se basa en la información del periodo mayo 2012 abril del 2014 (mayo 2012–abril 2013; mayo 2013–abril 2014). Se observa que en el periodo 2013–2014 en promedio la temperatura del aire fue mayor, registrándose -0.66 °C; en el periodo 2012–2013 fue de -0.71 °C; siendo el mes de noviembre el más cálido con 0.7 y 0.5 °C, respectivamente; por el contrario los meses más fríos corresponden al mes de julio, la temperatura para el periodo 2013–14 registró -2.8 °C en promedio y para el periodo 2012–13 fue de -2.5 °C. En la Tabla 3 se presentan estos resultados.

El análisis de distribución de la temperatura del aire diario (Figura 4) muestra que entre las 05:00 y 07:00 a. m. se registran las temperaturas mínimas del día, y las más bajas, en los meses de julio en

Tabla 4. Componentes del balance energético en los glaciares Quisoquipina, Zongo y Antizana

Glaciar	Latitud	Altitud (m)	Periodo	$S \downarrow$	$S \uparrow$	$L \downarrow$	$L \uparrow$	$S \text{ Net}$	$L \text{ net}$	$Q \text{ sensible}$	$Q \text{ latente}$	2*Referencia
(W/m^2)												
Quisoquipina	13°48'S	5180	2012-13	192	114	277	315	79	-37			
Quisoquipina	13°48'S	5180	2013-14	183	118	279	313	66	-34			
Zongo	16°S	5050	1999-00					72	-45	21	-31	Vincent et al. 2004
Antizana	0°28'S	4890	2002-03					123	-39	21	-27	Vincent et al. 2004

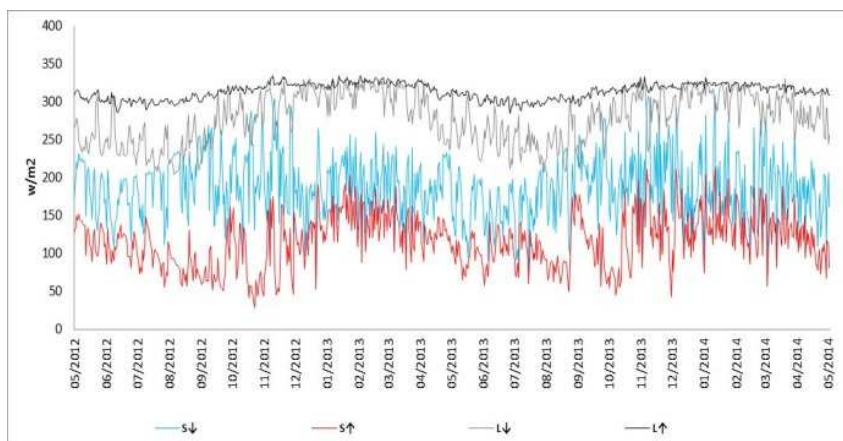


Fig. 5. Comparación de energía en onda corta incidente ($S \downarrow$), corta reflejada ($S \uparrow$), larga incidente ($L \downarrow$) y larga emitida ($L \uparrow$) sobre el glaciar Quisoquipina a paso de tiempo diario

ambos años; entre las 10:00 y 12:00 a. m. se registran las temperaturas más altas del día, próximas a los 4 °C, especialmente en el mes de noviembre para los dos años en estudio; también, se observa que las temperaturas máximas en los meses más fríos (julio) sobrepasan ligeramente los 0 °C entre las 11:00 a 13:00 horas. La comparación de los datos diarios (calculados en base al registro medio tomado cada 30 minutos) con los datos del reanálisis 1 (NOAA) a 500 hPa (5574 m s.n.m. aproximadamente) muestra un coeficiente de determinación de 0.47 y a nivel mensual un coeficiente de 0.79. Lo que significa que estos datos bajo una corrección pueden utilizarse para la reconstitución de series más largas de temperatura, considerando que los reanálisis tienen registros desde 1948.

Respecto al balance energético solo fueron calculados los componentes del balance neto Q_n para posteriormente compararlos con los resultados obtenidos (Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD)) en los glaciares Zongo y Antizana (Vincent et al., 2005), ubicados también en la región tropical y andina del planeta. Se consideró los mismos periodos de tiempo que los utilizados en la evaluación de la temperatura del aire. De la Tabla 4 se observa que la radiación solar incidente en onda corta ($S \downarrow$) oscila entre 192 a 183 W/m^2 respectivamente y la reflejada ($S \uparrow$) entre 114 a 118 W/m^2 ; la radiación en onda larga (infrarroja) incidente ($L \downarrow$) fluctúa entre 277 W/m^2 y 279 W/m^2 y la emitida ($L \uparrow$) entre 315 a 313 W/m^2 ; dando un total de entre 66 a 79 W/m^2 para el balance neto en onda corta ($S \text{ Net}$); y entre -37 a -34 W/m^2 para el balance neto en onda larga ($L \text{ Net}$). Estos valores al ser comparados con los datos de glaciar Zongo (glaciar en la Cordillera Real de Bolivia, aproximadamente a 350 kilómetros al sur del glaciar Quisoquipina) presentan cierta similitud, tanto para la $S \downarrow$ y como para el $L \text{ Net}$. Cuando se compara con los datos del glaciar de Antizana (ubicado en Ecuador, aproximadamente a 1700 kilómetros al norte del glaciar Quisoquipina) se observa que el $S \text{ Net}$ es de 123 W/m^2 , este valor está más alejado de los valores del Quisoquipina; pero el $L \text{ Net}$ sí presenta un valor próximo al calculado al Quisoquipina. Respecto al $Q \text{ sensible}$ y $Q \text{ latente}$, estos no han sido medidos para el glaciar de Quisoquipina; pero al observar que el balance neto en el glaciar Zongo es parecido al de Quisoquipina,

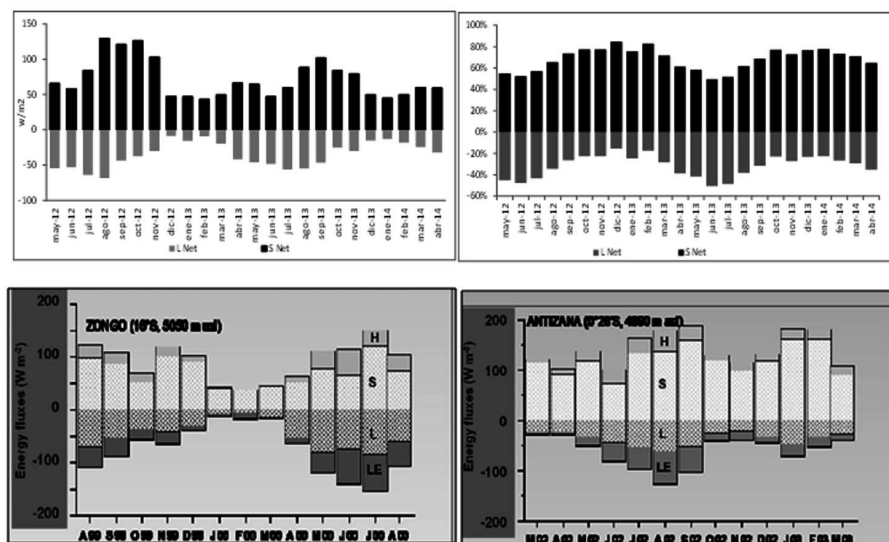


Fig. 6. Balance neto en onda corta (*S Net*) y onda larga (*L Net*) sobre el glaciar Quisoquipina (figura superior izquierda), Balance neto en onda corta (*S Net*) y onda larga (*L Net*) sobre el glaciar Quisoquipina expresado en porcentaje (figura superior derecha) donde el Balance neto total representa el 100%, balance energético sobre el glaciar Zongo (figura inferior izquierda) y balance energético sobre el glaciar Antizana (figura inferior derecha.), estos dos últimos tomados de Vincent et al. (2005)

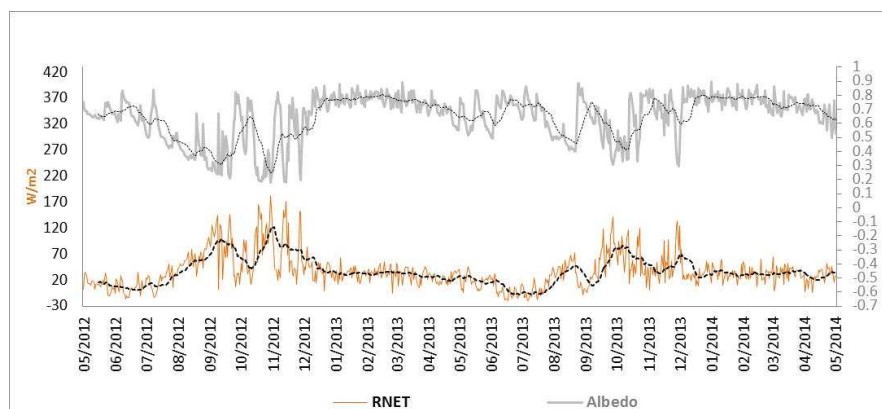


Fig. 7. Comparación entre el balance neto (Q_{net}) y el albedo sobre el glaciar Quisoquipina a paso de tiempo diario

posiblemente este último tenga valores muy próximos. Es importante destacar que los flujos turbulentos dependen del viento, de la temperatura del aire y la humedad relativa, por tanto si ante la hipótesis que estas variables son similares entre el Zongo y Quisoquipina se puede asumir que $Q_{sensible}$ y Q_{latent} también sean similares en el glaciar Quisoquipina. En la Figura 5 se muestra los datos de los componentes del balance neto.

Un análisis a nivel mensual muestra que al igual que en el glaciar Zongo y Antizana, el Q_n y específicamente *S Net* son dominantes en los procesos de intercambio energético glaciar-atmósfera, siendo mayor durante los meses de verano del hemisferio sur. Los flujos turbulentos de calor sensible (*H*) y calor latente (*LE*) son presentados para el Zongo y el Antizana; al evaluar en términos porcentuales sobre el glaciar Quisoquipina el flujo energético del balance neto, se observa que éste es controlado principalmente por el *S Net*, siendo más importante en los meses de noviembre a febrero (controlan entre el 60 a 80% del flujo energético de la radiación neta).

En la Figura 7, el balance neto (Q_{net}) respecto al albedo se observa fuerte dependencia de este último respecto al primero. Considerando que el albedo está vinculado a la precipitación sólida (nieve específicamente) se puede deducir un importante rol de este en la fusión del glaciar. De esta misma Figura se observa que entre los meses de setiembre a diciembre el balance neto diario es más importante, lo que significa que durante estos periodos el glaciar presenta su mayor ablación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La evaluación del glaciar Quisoquipina muestra que al igual que en otros glaciares tropicales del planeta se está reduciendo su superficie glaciar, habiendo perdido 0.4 km^2 entre el año 1990 al 2010, lo cual representa en términos equivalentes que ha aportado caudal de agua entre un rango de 44 a 117 l/s (principalmente escorrentía superficial e infiltración). Estos volúmenes constituyen un límite superior del aporte debido al retroceso glaciar. El estudio climático, basado en los datos obtenidos sobre el glaciar Quisoquipina durante dos años, muestra que la radiación neta (evaluando solamente longitudes de onda corta y larga) tiene un comportamiento similar al del glaciar Zongo (Cordillera Real), donde el factor dominante del balance neto de radiación es la energía en onda corta (balance en onda corta), fuertemente ligado al albedo, de donde se desprende el rol importante que tiene la nieve en los procesos de ablación glaciar (a mayor albedo se da menor intercambio energético entre el glaciar y la atmósfera lo que se traduce en una menor tasa de ablación). Se puede concluir y confirmar que tanto la energía solar en onda corta como la precipitación sólida son factores determinantes en la fusión de los glaciares ubicados en la parte sur de la región tropical del hemisferio sur. Aparentemente, se deduce que el mayor aporte hídrico glaciar (por fusión) debería darse en los meses de setiembre a noviembre, debe entenderse que en los meses de enero a marzo puede tenerse mayores caudales en las cuencas glaciares debido no solo al aporte del glaciar (sigue siendo menor al de setiembre–noviembre) sino también al aporte de la precipitación líquida (en setiembre a noviembre recién está comenzando el periodo de lluvias).

La obtención de datos meteorológicos en los glaciares del Perú representa un gran desafío; por un lado, las condiciones climáticas a esas alturas (temperaturas bajas, vientos fuertes, superficie variable) y por otro lado el difícil acceso. Los dos años de mediciones en el glaciar Quisoquipina proporcionan información valiosa para mejorar el conocimiento sobre las condiciones meteorológicas en los glaciares tropicales. Para futuros estudios habría que considerar algunos aspectos importantes respecto a la instalación de las estaciones meteorológicas, los instrumentos y al análisis de datos.

En primer lugar, en el nevado Quisoquipina, la temperatura del aire se mide con un instrumento no ventilado. Sin embargo, Georges y Kaser (2002) mostraron para la Cordillera Blanca que la diferencia entre mediciones de temperatura ventilada y no ventilada puede alcanzar 1.3 K en el día, debido a la radiación alta y bajos vientos. Para futuros estudios habría que considerar si el viento es suficiente para la ventilación del instrumento (constantemente sobre 3.5 m/s) y, si no es el caso, instalar un instrumento ventilado. Sin un instrumento ventilado de contraste de la estación meteorológica es difícil validar los datos medidos con un instrumento no ventilado y estimar la sobreestimación de la temperatura del aire.

Por otro lado, las mediciones de radiación también tienen sus dificultades. El instrumento tiene que estar en dirección horizontal, lo que tratamos de cumplir con el método usando el estabilizador giroscopio; pero se podría medir con un inclinómetro automático. Asimismo, un análisis simple nos indica, si las mediciones de onda larga emitida si son plausibles usando la fórmula de Stefan–Boltzmann. Como la superficie de hielo/nieve no puede superar los $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, podemos estimar la radiación de onda larga que corresponde. Concluimos que las mediciones no deben superar un valor de 316 W m^{-2} . Si la medición supera este límite, hay una indicación que la posición del instrumento no está en dirección horizontal o que habría que recalibrarlo.

PERSPECTIVAS

Los primeros estudios del balance energético en base a la información registrada en la estación meteorológica en el glaciar Quisoquipina representa un paso fundamental para su monitoreo y estudios masivos; sobre todo tiene importancia estratégica en términos de reservas de agua para la región de Cusco. Actualmente, el SENAMHI está trabajando juntamente con la UNSAAC en el estudio del glaciar Quisoquipina, se espera que para el verano del 2015 se comience a controlar los caudales generados por este glaciar, y paralelamente iniciar con la Autoridad Nacional del Agua (ANA) estudios sobre el balance de masa; lo que posteriormente permitirá implementar un modelo hidrológico para conocer los caudales del río Urubamba futuros, así como también entender más los procesos de ablación en la Cordillera del Vilcanota.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Regional del SENAMHI en Cusco por mantener operativa la estación como también al proyecto PRAA financiado por el Banco Mundial e implementado por la Comunidad Andina (CAN), proyecto PACC y Helvetas Swiss Intercooperation, Proyecto Glaciares y CARE Perú, ambos proyectos financiados por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), Universidad de Zurich, Meteodat y al IRD por apoyar este trabajo desde el año 2010

BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad Nacional del Agua. (2012). Inventario de glaciares de las cordilleras Vilcanota /Carabaya (Primera). Huaraz, Perú.
- Bahr, D. B., Meier, M. F., & Peckham, S. D. (1997). The physical basis of glacier volume–area scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20355–20362. doi:10.1029/97JB01696.
- Brecher H., H., & Thompson G., L. (1993). Measurement of the retreat of Qori Kalis glacier in the tropical Andes of Peru by terrestrial photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59, 1017–1022.
- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically–corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165–178. doi:10.1016/j.rse.2013.08.026.
- Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W., & Condom, T. (2011). Climate change threats to environment in the tropical Andes: Glaciers and water resources. *Regional Environmental Change*, 11(SUPPL. 1), 179–187.
- Francou, B., Vuille, M., Favier, V., & Cáceres, B. (2004). New evidence for an ENSO impact on low–latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D18), D18106. doi:10.1029/2003JD004484.
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., & Sicart, J.–E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D5), 4154. doi:10.1029/2002JD002959.
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., Stoffel, M. (2014). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313–2333. doi:10.5194/tc-8-2313-2014.
- Hidrandina S.A. (1989). Inventario de Glaciares del Perú. 2da Parte. Lima–Perú. CONCYTEC.
- Hock, R. (2005). Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*, 29(3), 362–391.
- Juen, I., Kaser, G., & Georges, C. (2007). Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59(1–4), 37–48. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.038.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40–Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–471. doi:10.1175/1520

- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1–4), 93–103 doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4).
- Kaser, G., Fountain, A., & Jansson, P. (2003). A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers by mountain glaciers (IHP-VI., Vol. 2003). Paris.
- Kaser, G., Georges, C., Juen, I., Mölg, T., Wagnon, P., & Francou, B. (2004). The behavior of modern low-latitude glaciers. *Past Global Changes News*, 12(1), 150–017.
- Mark, B. G., & Helmens, K. F. (2005). Reconstruction of glacier equilibrium-line altitudes for the Last Glacial Maximum on the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia: climatic and topographic implications. *Journal of Quaternary Science*, 20(7–8), 789–800. doi:10.1002/jqs.974.
- Marzeion, B., Cogley, J. G., Richter, K., & Parkes, D. (2014). Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. *Sciences*, 345(6199), 919–921.
- Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W., & Ribstein, P. (2005). On the future of the water resources from glacier melting in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Sciences*, 50(6), 999–1022. doi:10.1623/hysj.2005.50.6.999.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102.
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7(1), 103–118. doi:10.5194/tc-7-103-2013.
- Sicart, J. E. (2005). Atmospheric controls of the heat balance of Zongo Glacier (16°S, Bolivia). *Journal of Geophysical Research*, 110(D12), D12106. doi:10.1029/2004JD005732.
- Silverio, W., & Jaquet, J. M. (2005). Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95, 342–350. doi:10.1016/j.rse.2004.12.012.
- Suarez, W., Chevallier, P., Pouyaud, B., & Lopez, P. (2008). Modelling the water balance in the glacierized Parón Lake basin (White Cordillera , Peru). *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 266–277. doi:10.1623/hysj.53.1.266.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Brecher, H., Davis, M., León, B., Les, D., Mountain, K. (2006). Abrupt tropical climate change: Past and present. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(28), 10536–10543. doi:10.1073/pnas.0603900103.
- Vincent, C., Ribstein, P., Favier, V., Wagnon, P., Francou, B., Le Meur, E., & Six, D. (2005). Glacier fluctuations in the Alps and in the tropical Andes. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1–2), 97–106. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.08.010>.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3–4), 79–96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002.
- Wagnon, P., Ribstein, P., Francou, B., & Sicart, J. E. (2001). Anomalous heat and mass budget of Glacier Zongo, Bolivia, during the 1997/98 El Niño year. *Journal of Glaciology*.

